

Vilma Lahti

GEOLUJITTEIDEN KÄYTTÖ STABI- TEETIN PARANTAMISESSA

Kandidaatintyö

TIIVISTELMÄ

VILMA LAHTI: Geolujitteiden käyttö stabiliteetin parantamisessa

Geosynthetic reinforcement for stability

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 20 sivua

Marraskuu 2018

Rakennustekniikan kandidaatinohjelma

Pääaine: Infrarakenteet

Tarkastaja: Minna Leppänen

Avainsanat: Geolujitteet, stabiliteetti, geovahvisteet, Bishopin menetelmä

Tässä työssä tarkastellaan geolujitteiden ominaisuuksia ja toimintamekanismeja, kun tavoitteena on parantaa penkereen stabiliteettia. Stabiliteetin tutkimiseksi esitellään Bishopin lamellimenetelmä, jolla voidaan selvittää penkereen varmuus sortumista vastaan. Tutkitaan myös muita vaihtoehtoja stabiliteetin parantamiseksi ja geolujitteen laskennallinen vaikutus kokonaisstabiliteettiin. Geolujitteen tärkeimpiä ominaisuuksia stabiliteetin kannalta tutkittiin. Erityisesti tarkastellaan Tensar® TriAx® -geolujitteen tehokkuutta deformaation ja jännitystä vastaan.

Kolmisuuntaiset geolujitteet, kuten Tensar® TriAx® jakaa siihen kohdistuvan jännityksen yhtenäisemmin kuin kaksisuuntaiset geolujitteet, ja ne voivat siten olla tehokkaampia myös stabiliteetin parantamisessa. Tärkeimmät geolujitteen ominaisuudet stabiliteetin kannalta ovat vetolujuus, lujitteen ja maan välinen kitka sekä aukkoko.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
2.	GEOLUJITTEET	2
2.1	Geolujitetyypit.....	2
2.2	Geolujitteiden toimintaperiaate	3
3.	GEOLUJITTEIDEN OMINAISUUDET	5
3.1	Vetolujuus	5
3.2	Lujitteen ja maan välinen kitka	5
3.3	Aukkokoko	6
4.	STABILITEETTI	7
4.1	Bishopin lamellimenetelmä	9
4.2	Laskenta tehokkailla jännityksillä	11
4.3	Keinot stabiliteetin parantamiseen	12
4.4	Geolujitteen laskennallinen vaikutus stabiliteettiin.....	13
5.	TUOTE-ESIMERKKI: TENSAR® TRIAX®	14
5.1	TriAx® –lujitteen käyttö deformaation ehkäisyssä	14
5.2	Kolmisuuntaisen geolujitteen jännityskäyttäytyminen	17
6.	YHTEENVETO	20
	LÄHTEET	21

KÄSITTEET

Geolujite	Yleisnimike tuotteille, joita käytetään maan lujittamiseen
Kaksisuuntainen geolujite	Lujite, joka ottaa jännitystä vastaan kahdessa suunnassa
Kimmokerroin	Muuttuja, joka kuvaa aineen kykyä vastustaa muodonmuutosta jännityksen alaisena
Kolmisuuntainen geolujite	Lujite, joka ottaa jännitystä vastaan kolmessa suunnassa
Koheesio	Maarakeita koossapitävä vaikutus kitkan lisäksi
Leikkausjännitys	Materiaalin pintaan yhdensuuntaisesti vaikuttava jännitys, joka on kohtisuorassa normaalijännitystä vastaan
Leikkauslujuus	Leikkausjännityksen määrä, jonka maa kestää
Momentti	Systeemiin kohdistuva vääntövaikutus, joka kasvaa voiman ja sen etäisyyden systeemistä myötä
Stabiliateetti	Luiskan vakavuus sortumista vastaan liukupintaa pitkin
Vetolujuus	Kappaleen kyky vastustaa vastakkaisiin suuntiin vetävää voimaa

1. JOHDANTO

Penkereitä rakentaessa ongelmaksi voi syntyä sen sortuminen liukupintaa pitkin. Geolujitteita voidaan käyttää penkereen vahvistamisessa. Geolujitteet ovat teknistaloudellinen ja tehokas ratkaisu monessa rakennushankkeessa. Ne ottavat vastaan veto- ja leikkausjännityksiä, joita maa ei itsessään kestä (Liikennevirasto 2012, s. 19). Geolujitteita on useita eri tyyppisiä, kuten lujitekankaat, muoviset lujiteverkot ja erilaiset nauhat. Eri tuotteet on tehty soveltumaan parhaiten tietynlaiseen käyttötarkoitukseen ja maamateriaaliin.

Geolujitteiden käyttö voi mahdollistaa rakennushankkeessa korkeampien penkereiden rakentamisen ja huonolaatuisten materiaalien käyttämisen. (Liikennevirasto 2012, s. 19.) Etenkin pehmeälle maapohjalle rakennettaessa geolujittaminen on hyödyllistä sen sortumisherkkyuden vuoksi. Penkereen kokonaisvakavuus voi heiketä esimerkiksi rankkasateen tai syklisen kuorman myötä. (Duncan et al. 2010, s. 16 – 17.) Geolujitteita käytetään myös tierakenteiden sitomattomissa kerroksissa vähentämään deformaatiota ja pidentämään rakenteen käyttöikää (Hall & Kawalec).

Geolujitteen toiminta perustuu sen ja maan yhteistoimintaan, joka vaatii geolujitteelta vetolujuutta ja kitkaominaisuuksia maan suhteen (Aalto et al. 1998, s. 14). Geolujitteiden tärkeimmiksi ominaisuuksiksi voidaankin luokitella sen lujuus-muodonmuutosominaisuudet ja raaka-aineet.

Tässä työssä selvitetään, mitkä ominaisuudet tekevät geolujitteesta hyvän stabiliteetin parantamiseen. Työ on toteutettu kirjallisuusselvityksenä. Erityisesti tarkastellaan kolmioaukkoisen geolujitteen, tarkemmin Tensar® TriAx®-lujitteen, ominaisuuksia ja verrataan niitä perinteiseen suorakulmioaukkoiseen lujitteeseen. Työssä käsitellään stabiliteettilaskentaa Bishopin menetelmällä. Geolujitteiden tärkeiden ominaisuuksien määrittely on muuttunut ajan saatossa, joten näitä tapoja esitellään ja arvioidaan. Tämän selvityksen ulkopuolelle rajataan teräslujitteet.

2. GEOLUJITTEET

Geolujitteita käytetään rakenteen vakavuuden parantamiseen, mahdollistamaan huonolaatuisten materiaalien ja pienempien materiaalmäärien käyttämisen ja jyrkempien luisien rakentamisen. Niiden toiminta perustuu siihen, että geolujite vastaanottaa veto- ja leikkausjännityksiä, joita maa itsessään ei kestä. Lujitteilla voidaan parantaa maan kantavuutta ja rakenteen vakavuutta. (Liikennevirasto 2012, s. 19.)

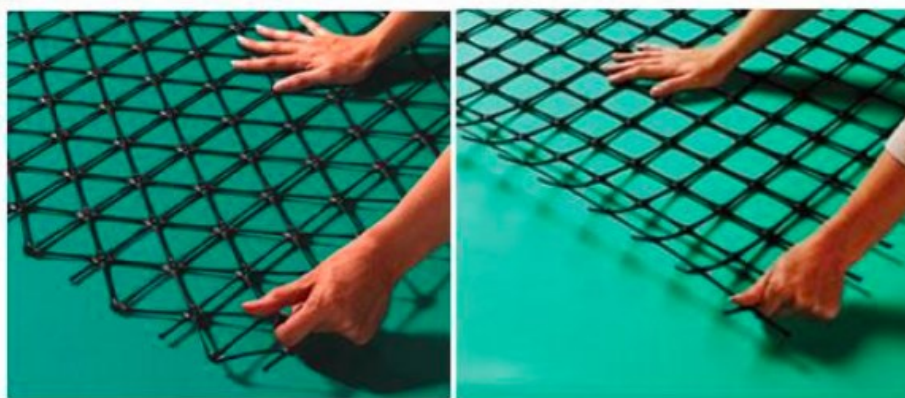
2.1 Geolujitetyypit

Jos kokonaisvarmuus ei ole riittävä ilman vahvistusta, voidaan sitä parantaa erilaisilla synteettisillä geolujitteilla. Synteettiset geolujitteet voidaan jakaa yksi-, kaksi- ja kolmiulotteisiin lujitteisiin. Kolmiulotteisia lujitteita ovat esimerkiksi geosellilujitteet tai kaksiulotteisista tuotteista tehdyt rakenteet. Kaksiulotteisia lujitteita ovat kudotut kankaat ja verkot. Yksiulotteisiin geolujitteisiin kuuluvat erilaiset nauhat ja liuskat. (Liikennevirasto 2012, s. 20.) Ne voivat myös olla nauhoja, tankoja tai kehikkoja. (Liikennevirasto 2012, s. 23.)

Vedetyt lujiteverkot valmistetaan ensin rei'ittämällä polymeerilevyä ja sitten venyttämällä niitä yhteen tai kahteen suuntaan. (Liikennevirasto 2012, s. 20)

Geolujitteet valmistetaan yleisimmin kestopuoveista kuten polyeteenistä (PE), polypropeenista (PP), polyeteenitereftalaatista (PET) ja polyamideista (PA). Polymeereihin lisätään valmistuksessa stabilaattoreita ja ne voidaan myös päällystää muoveilla, jotka esimerkiksi suojaavat auringon vaikutuksilta. (Liikennevirasto 2012, s. 21.) Lujitteen aukon muoto voi vaihdella. Yleisiä aukkomuotoja ovat neliö ja kolmio, esitettynä kuvassa 1. Geovahvisteiden tulee kestää UV-säteiden vaikutukset rakentamisvaiheen ajan ja myös maan kemialliset aineet ja bakteerit maan pH-arvon ollessa välillä 4–9 (Aalto et al. 1998, s. 30).

Kangasmaiset tuotteet ovat kudoksia, joissa on lankaryhmiä vähintään kahdessa eri suunnassa. Lankaryhmät ovat usein useiden lankojen kimppuja. Niiden lujuus ja muodonmuutosominaisuudet voivat vaihdella paljon valmistustavasta riippuen. Vedetyt lujiteverkot valmistetaan ensin rei'ittämällä polymeerilevyä ja sitten venyttämällä niitä yhteen tai kahteen suuntaan. (Liikennevirasto 2012, s. 20 – 21.)



Kuva 1. Geolujitteiden erilaisia aukkomuotoja (Hall & Kawalec)

Geolujitteet liitetään yhteen eri saumausmenetelmillä työmaalla tai tehtaalla. Kudotut kankaat saumataan usein ompelemalla. Geoverkkoja voidaan yhdistää tappi- tai sidontalankaliitoksilla. Saumaus voidaan tehdä myös kemiallisesti liimaamalla tai fysikaalisesti hitsaamalla tai kuumasaumaamalla. (Liikennevirasto 2012, s. 29 – 30.)

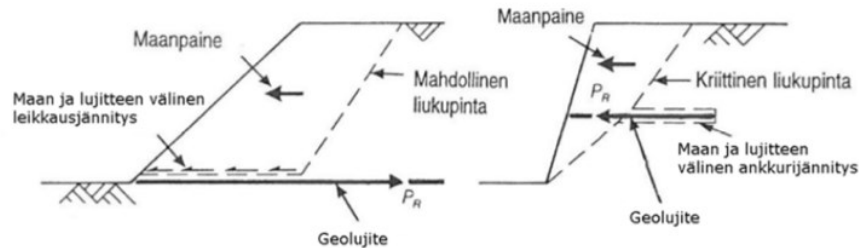
Geolujitteen saumakohta on kriittinen koko lujitteen toiminnan kannalta, sillä geolujitteen lujuus sauman kohdalla saattaa jäädä vajaaksi. Esimerkiksi liimaamalla saumasta voidaan tehdä yhtä luja kuin tuote olisi saumattomana. Synteettisiä geolujitteita käytettäessä on suositeltavaa käyttää useampaa lujitekerrosta, jotka asetetaan 90° kulmassa toistensa suhteen, saumaamisen tai limittämisen sijasta. Useampien lujitekerrosten tapauksessa kerrosten välissä tulee olla kitkamaakerros ja lujitteiden yhteistoimintaan ja rakentamistekniikkaan tulee kiinnittää erityistä huomiota. (Liikennevirasto 2012, s. 29 – 30.) Myös limittäminen voi olla riittävä saumaustapa tilanteissa, joissa saumat eivät joudu kovan rasituksen alaisiksi. Jos saumoihin ei kohdistu suuria vetojännityksiä, limityspituus voi vaihdella 0,3 – 1,0 metrin välillä. Muissa tapauksissa limityspituus määritellään kahden lujitteen välisen kitkan ja ankkuripituuden perusteella. (Aalto et al. 1998, s. 19.)

Geolujitettuja maarakenteita ovat muun muassa jyrkät luiskat, tukimuurirakenteet, penkereet pehmeiköllä ja paalutetut penkereet. Tässä työssä tarkastellaan geolujitteita ja stabiliteettia pehmeikölle rakennettavan penkereen kannalta.

2.2 Geolujitteiden toimintaperiaate

Geolujitteen toiminta perustuu maan ja lujitteen väliseen tartuntaan, joka voidaan saavuttaa kahdella tavalla: pelkällä maan ja geolujitteen välisellä kitkalla tai lukkiutumismekanismeilla. Lukkiutumismekanismi vaati maan tiivistämisen jäykkänurkkaisen lujitteen päälle, jolloin osa rakeista asettuu osittain aukkojen läpi ja osa kiilautuu aukkoihin. Tartunnan tulee estää lujitteen ja maan liukuminen toistensa suhteen ja vahvisteen tulee olla

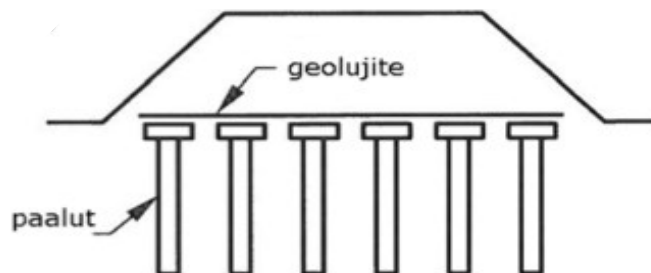
tarpeeksi pitkä, jotta lujitteessa oleva vetojännitys ankkuroituu. Vetojännitys ei voi ankkuroitua, jos geolujite ei ulotu kriittistä liukupintaa pidemmälle. Tällöin lujite ei voi kiinnittää sortumisvaarassa olevaa maamassaa penkereeseen. Ankkuroitumiseen vaikuttaa sekä kitka että kantava maanpaine. (Aalto et al. 1998, s. 26 – 27.)



Kuva 2. Geolujitteen liukumis- (vasemmalla) ja ankkuroitumismekanismi (oikealla) (Liikennevirasto, 2012)

Lujitetun maan tiiviysasteen tulee myös olla niin suuri, että maa pyrkii leikkausjännityksen vaikutuksesta laajenemaan. Ilman tarpeeksi suurta tiiviysastetta maan ja lujitteen välille ei synny tarpeeksi suurta tartuntaa. (Forsman & Slunga 1996, Liikenneviraston mukaan s. 49) Liukumismekanismeissa maa ei pääse liukumaan geolujitteen päällä tartunnan vuoksi. (Liikennevirasto 2012, s. 49) Liukumis- ja ankkuroitumismekanismi ovat esitetyinä kuvassa 2.

Geolujitteita käytetään myös paalutetuilla penkereillä, joissa paalut ottavat vastaan penkereen pystysuuntaisia kuormia. Tämä menetelmä on esitetty kuvassa 3. Paalujen käyttö penkereissä perustuu voimien holvautumiseen paaluhatuille. (Liikennevirasto 2012, s. 86.) Kuormat voivat mobilisoida paaluhatuille kahdella tavalla: Joko suoraan holvautumalla tai epäsuorasti paalujen päällä olevan geolujitteen kautta (Le Hello & Villard 2009). Tällöin geolujite jälleen parantaa myös reunan stabiliteettia ja kokonaisstabiliteettia (Liikennevirasto 2012, s. 87).



Kuva 3. Geolujitteen käyttö paalutetulla penkereellä (Liikennevirasto, 2012)

3. GEOLUJITTEIDEN OMINAISUUDET

Geolujitteen tärkeimmät ominaisuudet sen toiminnan kannalta ovat lujuus-muodonmuutosominaisuudet ajan funktiona sekä kitkaominaisuudet maan suhteen. Saumojen lujuudella ja toiminnalla on myös merkitystä koko lujitteen toimivuuden kannalta. (Aalto et al. 1998, s. 13.) Stabiiliteetin parantamiseksi geolujitteelta tarvitaan lujittavaa vaikutusta. Tämä saavutetaan vain, jos geolujitteella on tarpeeksi suuri ja säilyvä vetolujuus. Tarvittava vetolujuus mobilisoituu maassa. Rakenteessa saavutetaan hyvä vetolujuus, jos geolujitteella ei ole taipumusta suureen virumaan ja sen ja maan välillä on hyvä tartunta. (Rathmayer & Juvankoski 1992, s. 39)

3.1 Vetolujuus

Geolujitteen ottaessa vastaan maan veto- ja leikkausjännityksiä, tulee vahvistevoinman mobilisoitua. Mobilisoituminen vaatii lujitteen ja maan välisen siirtymän, joka puolestaan riippuu lujitteen jäykkydestä. (Aalto et al. 1998, s. 14.)

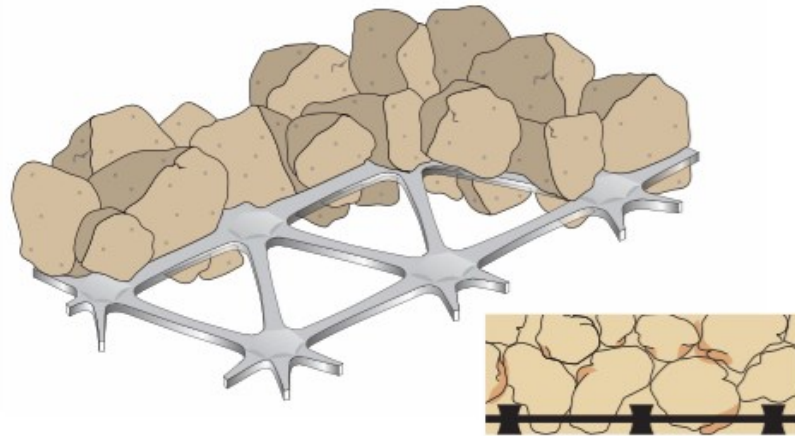
Geolujitteen vetolujuuden ominaisarvon määrittämisessä ensisijaisesti käytetään vähintään 1000 tunnin virumakokeen tuloksia. Toissijaisesti voidaan käyttää lyhytaikaisen vetokokeen tuloksia. Näiden kokeiden tuloksia tarvitaan geolujitteen mitoituslujuuden määrittämisessä. (Aalto et al. 1998, s. 28) Geolujitteet altistuvat pitkäaikaiselle kuormitukselle, joten niiden virumiskäyttäytyminen on tunnettava. Virumakokeessa lujitetta kuormitetaan vakiokuormalla, jolloin tuloksena saadaan venymän muutos ajan funktiona. Ainakin polyesteristä ja polypropyleenistä valmistetuilla geolujitteilla lämpötilan nousun on havaittu kasvattavan viruma-arvoja. (Liikennevirasto 2012, s. 27.)

Lämpötilan noustessa polymeerien lujuus heikkenee, joka puolestaan lisää viruman määrää. Lujuus laskee kaikista eniten polyeteenillä ja polypropeenillä. Verrattaessa lujuutta eri lämpötiloissa eri polymeereillä suurin lujuuden lasku havaitaan polyeteenillä ja polypropeenillä. 20 °C tasolla mitatusta lujuudesta on jäljellä vain 30%, kun polypropeeni saavuttaa 150 °C. Polypropeenin sulamispiste on 165°C. Polyeteenin lujuus puolestaan laskee 40 % alkuperäisestä sen saavuttaessa 50 °C. 150 °C lämmössä polyesterin lujuudesta on jäljellä vielä 70% ja polyamidin lujuudesta 60%. (Rathmayer & Juvankoski 1992, s. 23.)

3.2 Lujitteen ja maan välinen kitka

Geolujitteen toiminta vaatii maarakeiden lukkiutumisen verkkoon, kuten kuvassa 4. Karkearakeisten maalajien kohdalla käytetään lujitteita, joiden aukot ovat suuret. Liian pienet aukot estävät rakeiden lukkiutumisen, jolloin riittävää kitkaa ei muodostu ja lujite voi liukua maassa.

Maan liukumista lujitteen pintaa pitkin voidaan tutkia leikkauskokeella. Koe tehdään laboratoriossa asettamalla geolujite kahden maarasian väliin. Rasiaan kohdistetaan normaallivoima ylhäältäpäin, jolla imitoidaan lujitteen luonnollista tilaa maassa. Kokeesta saadaan selville maan ja lujitteen välinen leikkausvastus, joka kuvaa maan kykyä vastustaa liukumista lujitteen pinnalla. Kokeessa vedetään sivuttaissuunnassa joko rasian ylä- tai alaosa tietyllä voimalla, jolloin saadaan selville voimaa vastaava siirtymä. (Liikennevirasto 2012, s. 25.)



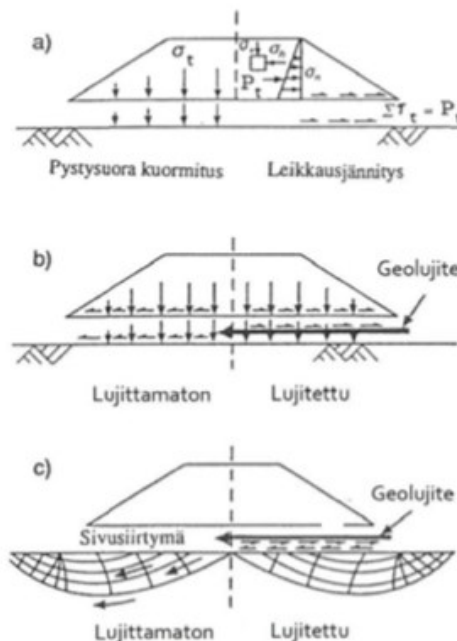
Kuva 4. Maarakeiden lukkiutuminen verkkoon (Tensar)

3.3 Aukkokoko

Geolujitteen aukkojen koko vaikuttaa lujitteen ja maan väliseen kitkaan. Jos aukot ovat liian suuria tai pieniä, maarakeet eivät lukkiudu verkkoon halutulla tavalla. Liian isot ja pienet rakeet liukuvat pitkin lujitteen pintaa. Maan ja lujitteen välille syntyy paras tartunta, kun rakeiden keskimääräinen koko $d_{50} = 0,25 \dots 0,66 \cdot \#$, jossa $\#$ on verkon aukkokoko (Aalto et al. Liikenneviraston mukaan 2012, s. 48).

4. STABILITEETTI

Stabiliteetin parantaminen on erityisen tärkeää rakennettaessa penkereitä pehmeälle pohjalle. Geolujitteen toimintaa pehmeiköllä havainnollistetaan kuvassa 5. Penkereen sortumisen mahdollisuus on korkea, kun rakennetaan savisella maalla. Erilaisten rakentamistoimien kuten maanleikkausten yhteydessä syntyy liikettä, joka voi johtaa luiskun sortumiseen (Huang 2014, s. 4). Penkereen vakavuuden toteaminen vaatii stabiliteetilaskentaa, joka tehdään usein laskentaohjelmilla. Stabiliteetin laskeminen käsin on silti myös yleistä. Tällöin Bishopin lamellimenetelmä on usein helpoin tapa selvittää rakenteen kokonaisvarmuus sortumaa vastaan.



Kuva 5. Geolujitteen toiminta maassa (Liikennevirasto 2012, s. 70)

Leikkauslujuuden vähenemistä voi aiheuttaa

- kasvanut huokosvedenpaine,
- maan halkeilu,
- maan, etenkin ylikonsolidoituneen saven, turpoaminen,
- saven deformatuminen muuttuvissa olosuhteissa,
- ”quick clay” –saven muodostuminen suolojen huuhtoutuessa,
- hauraiden materiaalien leikkauslujuuden heikkeneminen,
- syklinen kuorma ja rapautuminen (Duncan et al. 2010, s. 15 – 16).

Leikkausjännityksen kasvua puolestaan aiheuttavat

- kuormat tai vedellä täyttyneet halkeamat luiskän päällä,
- lisääntynyt veden määrä luiskän päällä tai vähentynyt vesi sen pohjalla,
- luiskän muuttuminen jyrkemmäksi esimerkiksi eroosion myötä tai
- maanjäristykset (Duncan et al. 2010, s. 16 – 17).

Penkereen päällä oleva lisääntynyt kuorma johtaa suurempaan leikkausjännitykseen, jonka vastavoimana maan oma leikkauslujuus toimii. Luiskän pohjalla olevat kasvaneet kuormat puolestaan tukevat penkerettä. Luiskän sortuessa ei ole kuitenkaan yleensä mahdollista osoittaa yhtä siihen johtanutta syytä, sillä vesi ja saviset maat käyttäytyvät usein arvaamattomasti. (Duncan et al. 2010, s. 17.)

Stabiilettilaskennassa selvitetään varmuuskerroin F . Varmuuskerroin kuvaa varmuutta murtumisvaaraa vastaan. Varmuuskertoimen ollessa yli 1, penkere on tasapainossa. Duncan et al. (2010) mukaan luiskän stabiilius vaatii sen, että maan leikkauslujuus on suurempi kuin sen leikkausjännitys. Luiskän sortuessa siis leikkauslujuus on heikentynyt tai leikkausjännitys kasvanut. Kaavassa (1) on osoitettu varmuuskerroin leikkauslujuuden ja leikkausjännityksen suhteena, jossa leikkausjännitys on liukupinnalle mobilisoitunut keskimääräinen arvo (Lehtonen 2010, s. 10).

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (1)$$

jossa

τ_f = leikkauslujuus

τ = liukupinnalle mobilisoitunut keskimääräinen leikkausjännitys

Varmuuskerroin voidaan myös esittää passiivimomentin ja aktiivimomentin suhteena.

$$F = \frac{M_p}{M_a} \quad (2)$$

jossa

M_p on passiivimomentti,

M_a aktiivimomentti.

Passiivivoima lasketaan jokaisen lamellin yhteenlasketuilla suljetun leikkauslujuuden c_u , liukupinnan kaaren pituuden Δl ja liukupintaympyrän säteen R tulona: (Aalto et al. 1998, s. 47.)

$$M_p = \sum c_u \cdot \Delta l \cdot R \quad (3)$$

Aktiivimomentti lasketaan lamellien painokeskipisteen etäisyyden ja liukupintaympyrän keskipisteen välisen etäisyyden X ja lamellin pengerosan painon tulona:

$$M_a = \sum X \cdot W \quad (4)$$

Passiivivoima voidaan laskea:

$$\Delta M_p = P_{RT} \cdot Y \quad (5)$$

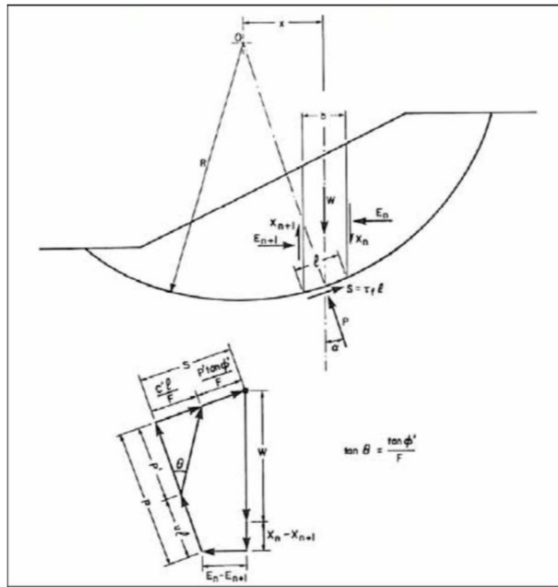
jossa P_{RT} on vahvisteelta vaadittava kokonaisvoima ja Y vahvisteeseen ja liukupintaympyrän keskipisteen välinen pystysuora etäisyys. (Aalto et al. 1998, s. 48.)

Kokonaisvarmuuden ollessa suurempi kuin yksi, rakenne ei teoriassa sorru, sillä penkeen kaatumista estävät voimat ovat suurempia kuin sitä kaatavat.

4.1 Bishopin lamellimenetelmä

Stabiilettilaskenta voidaan tehdä lamellimenetelmällä, jossa maan sortuman oletetaan tapahtuvan liukupintaa pitkin. Liukupinnan muoto voi vaihdella, mutta koheesiomaissa se on yleensä ympyrä. (Rantamäki et al. 2004, s.187.) Lamellimenetelmissä liukupintaympyrä jaetaan pystysuoriin pylväisiin, jotka voidaan valita käsin laskiessa niin, että laskeminen helpottuu. Lamellimenetelmällä lasketaan lamellin tai koko liukupinnan rajaa-
man alueen voima- ja/tai momenttitasapainoa. (Lehtonen 2010, s. 10.)

Lamellimenetelmän lisäksi kokonaisvarmuutta voidaan laskea elementtimenetelmään perustuvalla finiittielementtimenetelmällä (FEM). Stabiileetin laskemisessa käytetään usein laskentaohjelmia, jotka arvioivat vaarallisimman liukupinnan (Lehtonen 2010, s. 13), mutta Bishopin menetelmä on suosittu käsin laskennassa.



Kuva 6. Lamellimenetelmä Bishopin menetelmän mukaan. (Tavenas et al 1980 s. 63, Lehtosen mukaan)

Tässä työssä stabiileettia tarkastellaan Bishopin menetelmällä, joka on yleisesti käytetty menetelmä luiskun stabiileettilaskennassa. Kaikissa menetelmissä tehdään joitakin oletuksia lamelleihin vaikuttavista voimista. Bishopin menetelmässä lamellien väliset voimat oletetaan vaakasuuntaisiksi (Huang 2014, s. 231 - 232), eli lamellien välillä ei ole leikkausvoimia. Bishopin yksinkertaistettua menetelmää suositellaan käytettävän ympyräliukupinnalla (Huang 2014, s. 238), kuten kuvassa 6. Lamellimenetelmässä lamelleihin vaikuttavat voimat esitetään niiden aiheuttamina momentteina, joiden vipuvartena toimii etäisyys liukupintaympyrästä.

Kuvan 6 perusteella kokonaisvarmuus sortumaa vastaan voidaan laskea kaavalla (2):

$$F = \frac{\sum [c' \cdot b + \tan(\varphi') (W - u \cdot b + X_n - X_{n+1})]}{\sum W \cdot \tan(\alpha) \cdot \left(\frac{1 + \frac{\tan(\varphi') \cdot \tan(\alpha)}{F}}{1 + (\tan(\alpha)^2)} \right)} \quad (2)$$

jossa

c' = tehokas koheesio

φ' = tehokas kitkakulma

b = lamellin leveys

W = lamellin paino

X	= lamellien välinen pystysuora leikkausvoima
α	= lamellin pohjan kulma vaakasuuntaa vastaan
u	= huokosvedenpaine

(Lehtonen 2010, s. 12.)

Kaavasta nähdään, että kokonaisvarmuutta sortumaa vastaan kasvattavat koheesio ja lamellien paino penkereen luiskan alaosaan. Penkereen sortuman mahdollisuutta kasvattavat lamellien paino penkereessä ja ulkoiset voimat penkereen päällä. Maan lujutta kasvattavat tekijät, kuten kitkakulma tekevät kokonaisvarmuudesta suuremman.

4.2 Laskenta tehokkailla jännityksillä

Leikkauslujuus τ_f voidaan laskea tehokkaiden jännitysten tapauksessa tehokkaan koheesio, kitkakulman ja normaalijännityksen avulla. Tehokkaassa normaalijännityksessä otetaan huomioon huokosvedenpaine vähentämällä se normaalijännityksen arvosta, kuten kaavassa (6). Tällöin leikkauslujuuden kaavaksi Mohr-Coulombin mukaan saadaan:

$$\tau_f = c' + \tan(\varphi') \cdot (\sigma_n - u) \quad (6)$$

jossa

c'	= tehokas koheesio
φ'	= tehokas kitkakulma
u	= huokosvedenpaine
σ_n	= normaalijännitys

(Lehtonen 2010, s. 14.)

Kokonaisjännityksillä laskiessa leikkauslujuuden laskemisessa käytetään Mohr-Coulombin kaavaa, mutta koska tehokas kitkakulma asetetaan nolaksi ja koheesio tilalla käytetään yleensä suljetun leikkauslujuuden arvoa c_u , käytännössä leikkauslujuuden sijasta käytetään suljettua leikkauslujuutta. Suljettu leikkauslujuus kuvaa huokosvedenpaineen ja normaalijännityksen tilaa maassa.

Kokonaisvarmuus voidaan laskea kokonaisjännityksillä lamelleittain hyvin yksinkertaisesti myös käsin kaavan (7) mukaisesti. (Lehtonen 2010, s. 15)

$$F = \frac{R \cdot \sum \tau_f \cdot l}{\sum W \cdot x} \quad (7)$$

jossa

R = liukupintaympyrän säde

τ_f = leikkauslujuus

l = lamellin pohjan pituus

W = yksittäisen lamellin paino

x = lamellin ja liukupintaympyrän keskipisteiden välinen etäisyys

Kokonaisjännityksillä voidaan laskea vain, kun kuormitus on lyhytaikaista, sillä se soveltuu vain suljetun tilan stabiliteetin laskentaan. Suljetussa tilassa huokosvedenpaine ei ole ehtinyt virrata maasta pois kuormituksen vaikutuksesta. Savisilla mailla vesi poistuu kuormituksenalaisena olevasta maasta hitaasti, joten suljetulla leikkauslujuudella laskeminen on sopivaa. Kuitenkin huokosvedenpaineen jakautuminen ja suuruus on vaikeaa arvioida. (Lehtonen 2010, s. 15 – 16.)

4.3 Keinot stabiliteetin parantamiseen

Valittaessa tapaa penkereen stabiliteetin parantamiseen tulee huomioida lujittamistarpeen laajuus: halutaanko pelkästään lopettaa penkereen liikunnot vai tuleeeko sen kestää myös kuormia. Myös kustannukset ja käytettävissä olevan ajan määrä tulee ottaa huomioon. Jos aikaa on paljon käytettävissä, voidaan tehdä tarkempia tutkimuksia lujittamistarpeesta ja päätyä edullisempaan ratkaisuun. (Duncan et al. 2010, s. 259.)

Duncan et al. (2010) mukaan liian suuri huokosveden määrä penkereessä voi heikentää stabiliteetin varmuusluvun arvoa sen lisätessä painoa penkereen yläosaan. Siksi penkereen kuivattaminen on monesti tehokas tapa parantaa stabiliteettia. Penkerettä voidaan myös madaltaa tai tehdä siitä vähemmän kalteva. Erilaiset tukirakenteet vähentävät penkereen leikkausjännityksiä. Penkereeseen voidaan myös injektoida kovettuvia aineita, kuten sementtilaastia. Pintakasvillisuuden lisääminen estää eroosiota ja pinnan liukumista. Kasvillisuuden juuristo sitoo maaperää ja voi vähentää huokosvedenpainetta. Jos maassa on liukunut ja häiriintynyt liikkeen seurauksena, ainoa vaihtoehto saattaa olla massanvaihto. Massanvaihto vaatii kuitenkin kaivannon tekemistä, joka tekee luiskasta entistäkin jyrkemmän. Tämän vuoksi penkere tulee ensin esimerkiksi kuivattaa. (Duncan et al. 2010, s. 260 – 271.)

Geolujitteita käytetään jyrkkien luiskien rakentamisessa tilanteissa, joissa ei tilanpuutteen vuoksi voida rakentaa loivaa luiskaa. Luiskat, joiden kaltevuus on yli 45° , suositellaan lujitteen taivuttamista luiskan reunaa lähestyessä tai jotain muuta suojaustapaa. (Liikennevirasto 2012, s. 120.)

4.4 Geolujitteen laskennallinen vaikutus stabiliteettiin

Kokonaisvarmuus sortumista vastaan muodostuu passiivimomentin ja aktiivimomentin suhteesta. Passiivimomenttiin kuuluvat penkereen kaatumista estävät voimat ja aktiivimomenttiin penkerettä kaatavat voimat. Geolujitteita käytettäessä lujitteen aiheuttama momentti lisätään passiivimomenttiin. (Aalto et al. 1998, s. 47.)

Tällöin vahvistetun penkereen varmuusluvuksi F saadaan:

$$F = \frac{M_p + \Delta M_p}{M_a} \quad (8)$$

jossa

M_p on passiivimomentti,

ΔM_p passiivimomentin lisäys ja

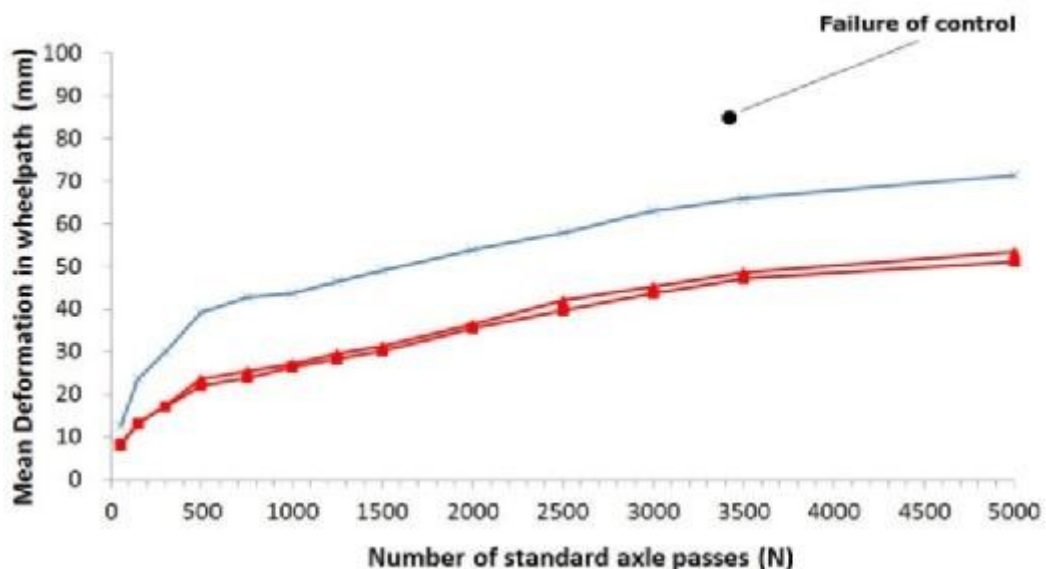
M_a aktiivimomentti.

5. TUOTE-ESIMERKKI: TENSAR® TRIAX®

Tensar® TriAx®-lujitteen ominaisuuksia on verrattu tutkimuksissa perinteisiin kaksisuuntaisiin lujitteisiin. Tutkimukset käsittelevät lähinnä kolmisuuntaisen geolujitteen vaikutusta katurakenteen deformatumiskäyttäytymiseen. Tässä kappaleessa käsitellään kolmioaukkoisen geolujitteen ominaisuuksien, kuten vetolujuuden, mittaustapoja ja arvioidaan niiden käyttökelpoisuutta.

5.1 TriAx®-lujitteen käyttö deformatumisen ehkäisyssä

Jännitys ja venymä jakautuvat yhtenäisemmin kolmioaukkoisessa geolujitteessa kuin yksi- tai kaksisuuntaisissa lujitteissa (Parsons & Sun 2014, s. 2569). Yleinen tapa testata geolujitteen tehokkuutta on liikennöintitesti, jossa materiaalin deformatumista mitataan toistuvan rengaskuormituksen yhteydessä. Kuvassa 7 on yhdistetty kansallisten ja valtiollisten tutkimuslaitosten saamia tutkimustuloksia geolujitettujen katurakenteiden deformatumiskäyttäytymisestä. Taulukosta 1 voidaan nähdä, että punaisella merkityissä arvoissa on käytetty polypropyleenistä valmistettu kolmiulotteista geolujitetta ja sinisellä merkitty kuvaaja kertoo kaksisuuntaisen geolujitteen käyttäytymisestä. Kuvaan on merkitty myös piste, jossa lujittamattomassa rakenteessa tapahtuu suurempi, kuin 75 mm deformatuminen. (Hall & Kawalec.)



Kuva 7. Tyypillisiä katurakenteen deformatumisarvoja riippuen kuormituskerroista (Hall & Kawalec)

Taulukko 1. *Geolujitettujen katurakenteiden deformatumiskäyttäytymisen muuttujat (Hall, Kawalec)*

Viiva	Tyyppi	Kokeen muuttujat, joilla on merkittävä vaikutus suoritukseen			
		Kerros- paksuus mm	Kerroksen rakeisuus	Pohjamaan vahvuus kN/m ²	Suhteellinen tiiviys (tyypillinen)
■	Kontrolli, mur- topiste, jossa deformaatio >75 mm	311±10	0 – 63 mm U = 47 – 72 $\bar{U} = 64$	43,1	104%
—	Yleisesti käy- tetty kaksiaksi- aalinen poly- propyleenilujite alakerroksen lujittamisessa	302±08	0 – 63 mm U = 47 – 72 $\bar{U} = 64$	43,8	104%
—	Yleisesti käy- tetty kolmiaksi- aalinen poly- propyleenilujite alakerroksen stabilisoinnissa	304±07	0 – 63 mm U = 47 – 72 $\bar{U} = 64$	43,0	104%

Liikennöintitesti voidaan tehdä laboratoriossa, kuten kuvassa 8, tai täysimittaisella testillä isommassa mittakaavassa. Testin perusteella voidaan tehdä päätelmiä katurakenteen kestävydestä. Laboratoriossa tehtävä testi on pienen mittakaavan koe ja parametrit, kuten maamateriaalin raekoot, ovat tarkasti säädellyt. Kerrospaksuudet, kerrosten pinta ja renkaan nopeus on mitattava ja valmisteltava tarkasti. Tällä testimenetelmällä ei tosin saada yhtäjaksoisesti yhteneviä tuloksia. 25 mm deformaatio voi olla 700 – 3500 kuormituskerran tulos. Testitulokset ovat siis hyödyllisiä, mutta ne eivät kerro lujitteen toimivuudesta määrittelevästi. (Hall & Kawalec.)



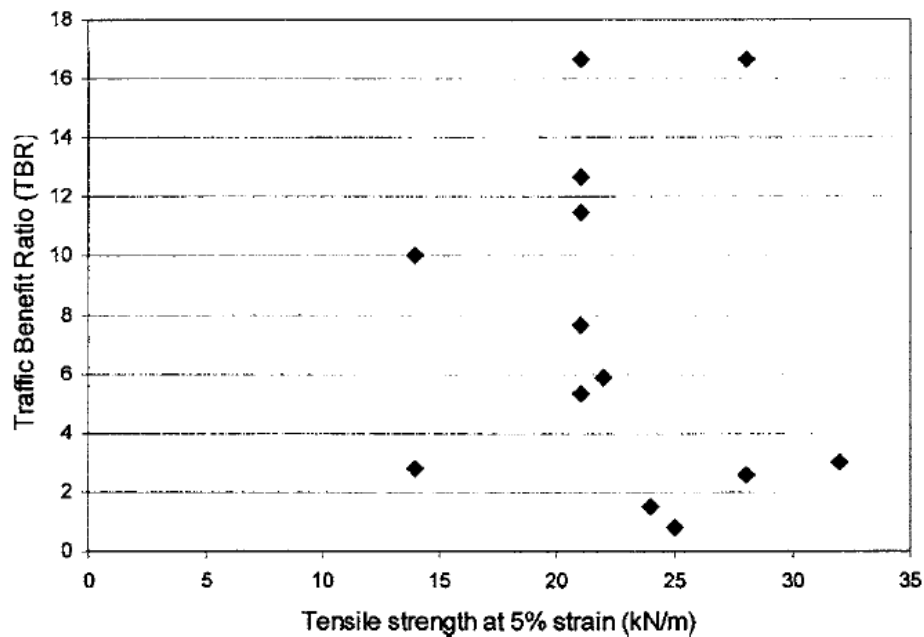
Kuva 8. Liikennöintikoe ”trafficking test”, jossa mitataan deformatumista syklisen kuorman alla. (Hall, Kawalec)

Geolujitteen sopivuuden arvioinnissa käytetyt arviointitavat ovat muuttuneet historian aikana. Yleisesti käytetty tapa on ollut tehdä lista lujitteen ominaisuuksista, kuten aukkojen läpimitasta ja vetolujuuden arvosta. Kun lujitteiden käyttö yleistyi, ominaisuuksien vertailussa alettiin käyttää yhden tai kahden ominaisuuden arvoa määrittävänä tekijänä. Nämä variaabelit olivat lähinnä maksimivetolujuus tai kimmokerroin. Mitä suurempi mitatun kimmokertoimen tai lujuuden arvo oli, sitä parempana pidettiin sen kykyä ottaa maan vetojännitystä vastaan. (Tensar, 2010)

Traffic benefit ratio (TBR) kertoo lujitteen tuomasta hyödystä tierakenteessa. Se ilmaistaan jakamalla tietyn deformaation saavuttamiseksi tarvittujen kuormituskertojen määrä käyttäen rakenteessa lujitetta kuormituskerroilla, jotka tarvittiin deformatumisen saavuttamiseksi ilman lujitetta.

$$TBR = \frac{\text{Tietyn deformaation saavuttamiseksi vaaditut kuormituskerrat lujitteella}}{\text{Tietyn deformaation saavuttamiseksi vaaditut kuormituskerrat ilman lujitetta}} \quad (9)$$

Kuitenkaan mitattu vetolujuus 5% venymällä ja TBR eivät korreloi (Giroud et al. 2006, Tensarin mukaan). Kuvasta 9 huomataan, että testitulokset vetolujuudesta ja TBR eivät asetu minkäänlaiselle janalle. Tärkeämpää onkin siis lujitteen ja maan yhteisvaikutus. Tehokkaampi tapa mitata geolujitteen käyttökelpoisuutta on sen vääntölujuus. ”Aperture stability modulus” tarkoittaa lujitteen kykyä vastustaa kiertävää voimaa. Tämän suureen ja lujitteen suorituskyvyn välillä tierakenteessa löydettiin yhteys (Kinney ja Xiaolin, 1995, Tensarin mukaan). Tämäkään mittaamenetelmä ei tosin toiminut myöhemmin markkinoille tulleille hitsatuille lujitteille, eikä myöskään Tensarin TriAx® -geolujitteelle. TriAx® -lujitteen kiertöjäykkyys ja vetolujuus ovat huomattavasti pienempiä, kuin aikaisemmin käytettyjen Tensarin kaksisuuntaisten lujitteiden vastaavat arvot. Silti TriAx® -lujite suoriutuu rakenteissa edeltajäänsä paremmin. Kylkien risteämisalueen sijoitusta 6 kylkeä neljän sijaan kolmiulotteisessa lujitteessa saavutetaan tehokkaampi jännitys jakauma. (Tensar, 2010.)

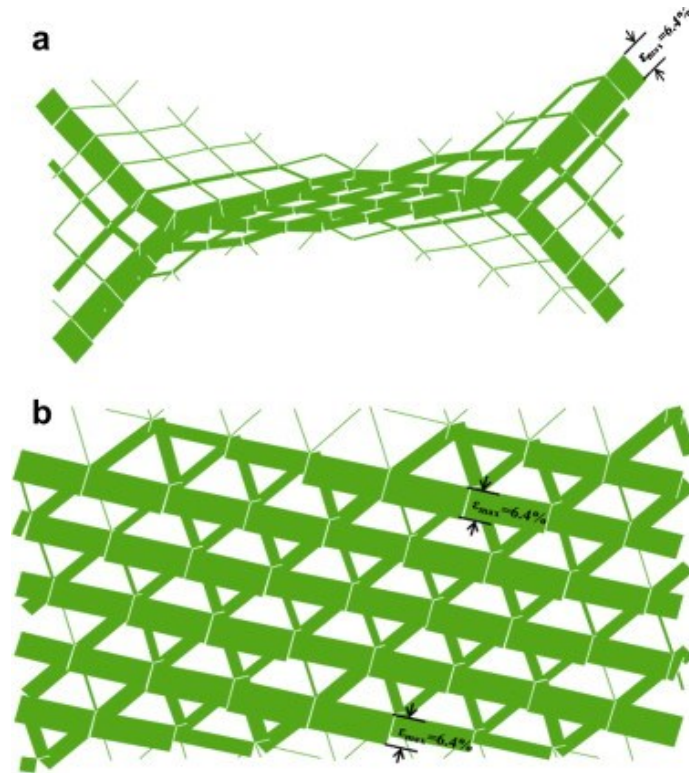


Kuva 9. Mitatut vetolujuudet 5% venymällä sekä vastaava TBR-arvo. (Tensor, 2010)

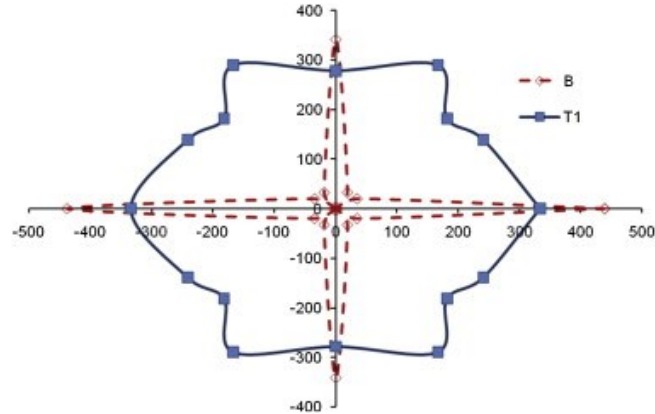
5.2 Kolmisuuntaisen geolujitteen jännityskäyttäytyminen

Dong et al. (2011) on tutkinut kolmisuuntaisen geolujitteen jännityskäyttäytymistä suhteessa kaksi- ja yksisuuntaisiin lujitteisiin. Yksisuuntaisten geolujitteiden on tarkoitus ottaa jännitystä vastaan yhdessä suunnassa ja kaksisuuntaisten kahdessa suunnassa. Kolmisuuntaisten lujitteiden voidaan olettaa ottavan jännitystä vastaan yhtenäisemmin sen rakenteen ollessa stabiilimpi. (Dong et al. 2011.)

Tutkimuksessa geolujitteita altistettiin yksisuuntaiselle kuormalle. Todellisuudessa kuormat kohdistuvat yleensä kahdesta tai useammasta suunnasta, mutta yksisuuntainen kuorma on yleisin tapa mitata geolujitteen jännitys-venymä –käyttäytymistä. Tutkimuksessa selvitettiin myös kuorman suunnan, aukkojen risteämisalueen ja lujitteen kimmo-kertoimen vaikutusta vetojännitykseen. Kuvassa 10 esitetään kuorman jakautuminen lujitteeseen 45° kulmasta tehdyn kuorman alaisena maksimivenymän ollessa 6,4%. Kaksisuuntaisessa lujitteessa havaitaan virumaa, kun taas kolmisuuntaisessa venymät ovat melko tasalaatuisia. Kaksisuuntaisten geolujitteiden tapauksessa kuorman kanssa kohtisuorassa olevat lujitteen kyljet eivät venyneet lähes yhtään. (Dong et al. 2011.)



Kuva 10. Jännityksen jakautuminen kaksisuuntaisessa (a) ja kolmisuuntaisessa (b) geolujitteessa kuorman tullessa 45° kulmassa. (Dong et al. 2011)



Kuva 11. Geolujitteiden B ja T1 vetojäykkyydet 360° ympärillä, yksikkönä kN/m
Dong et al. 2011

Kuvassa 11 verrataan kaksisuuntaisen (B) ja kolmisuuntaisen (T1) vetojäykkyyttä kuormitettaessa lujitetta 360° asteen ympärillä. Kuvasta 10 huomataan, että kaksisuuntaisella geolujitteella on kolmisuuntaista lujitetta suurempi vetojäykkyys 0° ja 90° kulmassa, mutta se nopeasti laskee siirryttäessä näistä suunnista pois. Molemmilla lujitteilla vetojäykkyys on pienimmillään kuormitettaessa 45° kulmassa, mutta kolmisuuntaisen lujitteen vetojäykkyys on paljon tasaisemmin jakautunut. (Dong et al. 2011.) Materiaalien teknisten ominaisuuksien arvot ovat esitettyinä taulukossa 2.

Taulukko 2. Vetojäykkyyden mittauksessa käytettyjen materiaalien arvot. (Dong et al. 2011)

Tyyppi	Jännitysmoduuli (GPa)	Risteämisalue ($\times 10^{-6} \text{ m}^2$)	Inertiamomentti ($\times 10^{-12} \text{ m}^4$)	Myötöraja (MPa)
B	2.625	3.81	0.512	168
T1	2.625	3.81	0.512	168

6. YHTEENVETO

Stabiliteetin parantamisessa voidaan käyttää useita menetelmiä, kuten penkereen kuivatamista, madaltamista tai injektoimista. (Duncan et al. 2010, s. 260 – 271.)

Geolujitteiden käyttö voi helpottaa rakentamistyötä, sillä ne mahdollistavat heikkolaatuisten materiaalien käytön ja jyrkempien luiskien rakentamisen. (Liikennevirasto 2012, s. 19.) Lujitetyyppi tulee valita oikein, sillä maan ominaisuudet ja geolujitteen käyttötarkoitus vaikuttavat siltä vaadittaviin ominaisuuksiin.

Stabiliteetin parantamisessa geolujitteen tärkeimmät ominaisuudet ovat veto-muodonmuutosominaisuudet ja tartuntaominaisuudet, joihin lukeutuu verkon aukkoko. Geolujitteella on oltava tarpeeksi suuri vetolujuus, jotta se voi ottaa vastaan maan veto- ja leikkausjännityksiä. Geolujitteen materiaali ei myöskään saa virua liikaa. (Rathmayer, Juvankoski 1992, s. 39.)

Geolujite parantaa penkereen stabiliteettia liukumis- ja ankkuroitumismekanismeilla (Liikennevirasto 2012, s. 49). Maarakeiden tulee osittain kiilautua geolujitteen aukkoihin, jotta sen ja maan välille syntyy tarpeeksi hyvä tartunta (Aalto et al. 1998, s. 26 – 27).

Geolujitteiden käyttöä stabiliteetin parantamisessa tulisi tutkia lisää. Tutkimusta on tehty paljon geolujitteiden vaikutuksista tien deformaumisessa. Uudenlainen kolmisuuntainen geolujite vastaanottaa jännitystä yhtenäisemmin kuin kaksi- tai yksisuuntaiset (Dong et al. 2011). Siksi Tensar® TriAx®-lujitteen kaltaiset tuotteet voivat olla tehokkaampia myös stabiliteetin parantamisessa.

LÄHTEET

Aalto, A., Slunga, E., Tanska, H., Forsman, J., Lahtinen, P. (1998). Synteettiset geovahvisteet, Suunnittelu ja rakentaminen, Teknillinen korkeakoulu, 138 s.

Dong, Y.L., Han, J., Bai, X.H. (2010). Numerical Analysis of tensile behaviour of geogrids with rectangular and triangular apertures, Geotextiles and Geomembranes, Volume 29, Issue 2, April 2011, ss. 83–91

Duncan, J.M., Wright, S.G., Brandon, T.L. (2010). Soil Strength and Slope Stability, John Wiley & Sons Inc, 318 s.

Hall, C.D., Kawalec, J. Accelerated Pavement Testing for Examining the Performance of Stabilisation Geosynthetics, Tensar International, saatavissa (viitattu 25.04.2017): <http://www.tensarcorp.com/Downloads?subPath=White%20Papers&languageFilter=English>

Huang, Y.H. (2014). Slope Stability Analysis by the Limit Equilibrium Method, American Society of Civil Engineers, 376 s.

Le Hello, B., Villard, P. (2009). Embankments reinforced by piles and geosynthetics – Numerical and experimental studies dealing with the transfer of load on the soil embankment, Engineering Geology, Issue 106, 2009, ss. 78-91

Lehtonen, V. (2010). Ratapenkereen sorrutuskokeen instrumentointi ja analysointi, Liikennevirasto, 150 s., saatavissa: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/121398/lts_2010-25_978-952-255-553-3.pdf?sequence=1

Liikennevirasto. (2012). Geolujitetut maarakenteet, tiegeotekniikan käsikirja, 159 s., saatavissa (viitattu 15.04.2017): http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lop_2012-02_geolujitetut_maarakenteet_web.pdf

Parsons, R.L., Sun, X., Kwon, J., Wayne, M.H., Han, J. (2014). Quantifying the Benefit of Triaxial Geogrid in Stabilizing Granular Bases over Soft Subgrade under Cyclic Loading at Different Intensities, Geo-Congress, ss. 2568-2577

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R., Tammirinne, M. (2009). Geotekniikka, Otatieto, 301 s.

Rathmayer, H., Juvankoski, M. (1992). Geosynteettiset tuotteet georakentamisessa, Suomen geoteknillinen yhdistys ry, 105 s.

Tensar (2010). Relevancy of Material Properties in Predicting the Performance of Geogrid-Reinforced Roadways, Tensar International